文章编号：1008－8857(2023)02－0128－09 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2023.02.009

连接体结构对固体氧化物燃料电池性能影响的数值分析

李梓豪，郭雪岩
（上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093）

摘 要：固体氧化物燃料电池(SOFC)中连接体结构对电池性能有重要影响。为探究连接体结构对固体氧化物燃料电池性能的影响，建立了传统直通、圆柱形、矩形和凹形 4 种不同连接体结构 SOFC 的三维数值模型，并对其流体流动、组分传递、电化学反应和固体流体传热的多物理场耦合过程进行了数值模拟。结果表明，在一定条件下，圆柱形、矩形和凹形连接体结构有利于电池中气体的传输，使电池的电流密度和输出功率均有所提升，其中凹形连接体结构的提升效果最明显，圆柱形、矩形连接体结构的次之。不同孔隙率下圆柱形、矩形和凹形连接体结构均优于传统直通连接体结构，在阴极孔隙率较小时其优势更加明显。

关键词：固体氧化物燃料电池；连接体结构；多物理场耦合；数值模拟
中图分类号：TM911.42 **文献标志码**：A

Numerical analysis on the performance of solid oxide fuel cells with different interconnector structures

LI Zihao，GUO Xueyan
(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The interconnector structure of solid oxide fuel cell (SOFC) plays a decisive role in the performance of fuel cells. In this paper, a three-dimensional numerical model of SOFC with four different types of interconnectors such as straight, cylindrical, rectangular, and concave was established to explore the effect of interconnector structure on the SOFC performance. Numerical analysis on the multi-physical field coupling process of fluid flow, species transfer, electrochemical reaction and solid-fluid heat transfer was performed. The results indicate that the cylindrical, rectangular, and concave interconnector can enhance the gas transport and increase the current density and power density in SOFC under certain conditions. Among these structures, the largest improvement is observed for the concave interconnector, following by the cylindrical and rectangular interconnectors. Within the whole investigated range of porosity, the cylindrical, rectangular, and concave interconnectors are superior to the straight interconnector, especially at

收稿日期：2022－07－25
第一作者：李梓豪(1995—)，男，硕士研究生。研究方向：计算流体力学。E-mail：lizihaogeorge@163.com
通信作者：郭雪岩(1964—)，男，教授。研究方向：计算流体力学。E-mail：xyguo@usst.edu.cn

smaller cathode porosity.

Keywords: solid oxide fuel cell; interconnect structure; multi-physical field coupling; numerical simulation

固体氧化物燃料电池（solid oxide fuel cell, SOFC）是一种高效、可持续的能源转换装置，可在中高温下直接将化学能转化为电能[1−2]。同时，SOFC 具有能量转化效率高、清洁无污染、燃料灵活性高，不需要昂贵催化剂等优点，成为替代化石能源的最佳选择之一[3−5]。

连接体作为 SOFC 的重要组成部件，主要用来连接电堆中相邻单电池的阴阳极，为电子传输提供通道，分割燃料气和氧化气并起到支撑的作用[6]。连接体结构直接影响反应气体的利用率以及燃料电池的使用寿命，对 SOFC 的综合性能有很大的影响[7]。传统直通连接体是目前最流行的设计，它是由平行的气体通道和肋条组成[8]。Jiang 等[9]通过研究电极与连接体接触面积大小对阳极支撑 SOFC性能的影响发现，随着电极与连接体接触面积的增大，电池电阻显著降低。Schluckner 等[10]指出，阴极最外层区域的扩散受限时会导致阳极支撑的平面 SOFC 堆栈局部空气的不足。Khazaee 等[11]研究了 3 种不同的流道截面，发现矩形截面的性能最好，三角形截面的性能次之，梯形截面的性能最差。Moreno-Blanco 等[12]对不同的直通流道尺寸（通道宽度、高度和数量）进行了比较，得出了最佳参数。有学者也会采用新颖的几何结构来强化传质，并通过减少电极与连接体的接触电阻提高燃料电池的性能。Canavar等[13]使用镍网代替传统连接体结构来收集电流并形成气体通道，通过选择合理的网目数、线径和孔隙率提高 SOFC 堆栈的输出功率。Chen 等[14]设计了一种新型双层连接体结构来提高阳极流道内的气体流速，有效强化了阳极多孔介质中的传质并降低了浓差过电位。Zhan 等[15]使用金属泡沫代替传统直通连接体，将电池功率密度提高了 13.74%。Yan 等[16]设计了一种螺旋状连接体，该连接体改变了气流方向，增加了垂直于三相边界的气体速度，改善了三相边界处氢气的浓度分布。Fu 等[17]提出了一种沟槽和肋条互连的新型连接体结构，通过提高反应气体的速度和涡量，促进气体在流道内的扰动，增强了电极中的质量传输。

综上可知，研究人员对于固体氧化物燃料电池连接体结构做了大量的研究，但对于离散型连接体结构的分析相对较少。本文分别建立了传统直通连接体和 3 种具有不同离散型连接体结构的 SOFC 模型，比较不同连接体结构对燃料电池气体摩尔分数分布、电流密度、功率密度和温度以及阴阳电极孔隙率的影响，以期为 SOFC 连接体结构的设计和运行提供一定的参考。

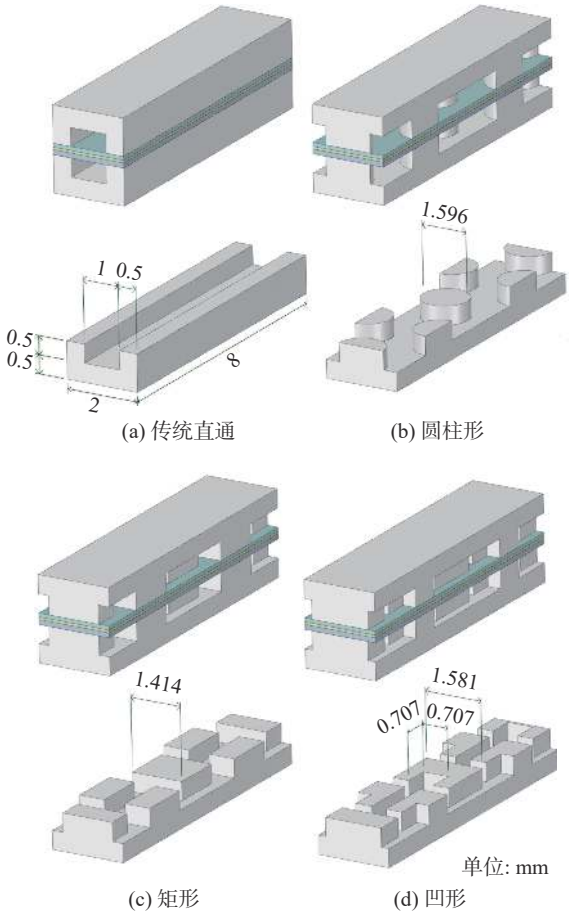
1　数值模拟

1.1　几何模型

本文建立了 4 种不同连接体结构的 SOFC 的三维模型。平板式 SOFC主要由连接体、气体流道、阴阳极电极层和电解质层组成。考虑到 SOFC 的对称性，为了缩短计算时间，选择重复单元作为模拟域。4 种不同连接体结构的 SOFC 的三维模型如图 1 所示。控制 4 种连接体和电极之间的接触面积均为电极表面面积的 1/2。模型中涉及的几何模型参数如表 1 所示。

1.2　数学模型

本文利用有限元模拟软件 COMSOL MULTIPHASICS对平板式 SOFC 模型进行流体流动物理场、物质传递物理场、电化学反应物理场和固体流体传热物理场的多场耦合。对 SOFC 模型进行简化假设：反应气体为理想气体；气体流动是单相不可压缩的层流流动；电解质层和电极层均为各向同性的多孔介质。入口边界条件为充分发展的流动，出口边界条件为压力出口，电池上、下壁面均设为无滑移绝热壁面，两侧设为无滑移对称边界条件。阳极流道通入含有水蒸气的氢气，阴极流道通入氧气与氮气的混合气体。主要操作参数如表 2 所示。



(a) 传统直通 (b) 圆柱形

(c) 矩形 (d) 凹形

图 1 4 种不同连接体结构的 SOFC 三维模型

Fig. 1 3D models of SOFC with four different interconnectors

表 1 几何模型参数

Tab. 1 Geometry of the models

电池组件参数名称	数值
阴极厚度/mm	0.5
阳极厚度/mm	0.03
电解质厚度/mm	0.025
流道宽度/mm	1
流道长度/mm	8
圆柱半径/mm	0.798
矩形边长/mm	1.414
凹形内、外边长/mm	0.707、1.581

1.2.1 控制方程

(1)连续性方程

表 2 主要操作参数

Tab. 2 Operating conditions

参数名称	数值
阴极入口体积流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	2×10^{-6}
阳极入口体积流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	2×10^{-7}
温度/K	873/973/1 073
压力/Pa	1×10^5
电压/V	0.7
气体入口温度/K	873/973/1 073
阴极O_2、N_2气体摩尔比	21 : 79
阳极H_2、H_2O气体摩尔比	8 : 2
阴极密度/($kg \cdot m^{-3}$)	8 750
阳极密度/($kg \cdot m^{-3}$)	8 640
电解质密度/($kg \cdot m^{-3}$)	2 000
连接体密度/($kg \cdot m^{-3}$)	8 700
阴极比热容/[$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]	385
阳极比热容/[$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]	380
电解质比热容/[$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]	300
连接体比热容/[$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]	396
阴极导热系数/[$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$]	4
阳极导热系数/[$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$]	2
电解质导热系数/[$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$]	2
连接体导热系数/[$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$]	6

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

式中：ρ、$\vec{u}$分别为混合气体密度、速度；∇为哈密顿算子。

(2)动量守恒方程

气道中的流动现象可使用 Navier−Stokes 方程表示为

$$(\rho \vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^{\mathrm{T}}) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \vec{u})\boldsymbol{I}] \quad (2)$$

式中：p为流体压力；μ为流体黏度系数；$\boldsymbol{I}$为单位矩阵。

多孔电极中使用描述多孔介质流动的 Brinkman 方程，即

$$\frac{\mu}{B_0}\vec{u}=-\nabla p+\nabla\cdot\frac{1}{\varepsilon}[\mu(\nabla\vec{u}+(\nabla\vec{u})^{\mathrm{T}})-\frac{2}{3}\mu(\nabla\cdot\vec{u})\boldsymbol{I}] \quad (3)$$

式中：B_0为多孔介质渗透率；ε为多孔介质孔隙率。

(3)电荷传输方程

电荷输运分为电子输运和离子输运，电荷守恒方程决定了电子和离子的电流密度大小。

电子、离子导电方程表达式分别为

$$-\nabla\cdot(\sigma_{\mathrm{e}}\nabla V_{\mathrm{e}})=\nabla i_{\mathrm{e}}=0 \quad (4)$$

$$-\nabla\cdot(\sigma_{\mathrm{i}}\nabla V_{\mathrm{i}})=\nabla i_{\mathrm{i}}=0 \quad (5)$$

式中：σ_{e}、σ_{i}分别为电极的电子导电率和电解质的离子导电率；V_{e}、V_{i}分别为电子电势和离子电势；i_{e}、i_{i}分别为电子电流密度和离子电流密度。

交换电流密度可用 Butler−Volume 方程进行描述。阴阳极法相电流密度$i_{\mathrm{an,tr}}$和$i_{\mathrm{ca,tr}}$分别为

$$i_{\mathrm{an,tr}}=i_{0,\mathrm{a}}\left[\exp\left(\frac{\alpha_{\mathrm{a,a}}F\left(\eta_{\mathrm{a}}-\eta_{\mathrm{a,eq}}\right)}{RT}\right)-\exp\left(\frac{-\alpha_{\mathrm{a,c}}F\left(\eta_{\mathrm{a}}-\eta_{\mathrm{a,eq}}\right)}{RT}\right)\right] \quad (6)$$

$$i_{\mathrm{ca,tr}}=i_{0,\mathrm{c}}\left[\exp\left(\frac{\alpha_{\mathrm{c,a}}F\left(\eta_{\mathrm{c}}-\eta_{\mathrm{c,eq}}\right)}{RT}\right)-\exp\left(\frac{-\alpha_{\mathrm{c,c}}F\left(\eta_{\mathrm{c}}-\eta_{\mathrm{c,eq}}\right)}{RT}\right)\right] \quad (7)$$

式中：$i_{0,\mathrm{a}}$、$i_{0,\mathrm{c}}$分别为阳极与阴极交换电流密度；$\alpha_{\mathrm{a,a}}$、$\alpha_{\mathrm{a,c}}$分别为阳极侧阳极、阴极电荷转移系数；$\alpha_{\mathrm{c,a}}$、$\alpha_{\mathrm{c,c}}$分别为阴极侧阳极、阴极电荷转移系数；$\eta_{\mathrm{a}}-\eta_{\mathrm{a,eq}}$和$\eta_{\mathrm{c}}-\eta_{\mathrm{c,eq}}$为活化过电压；$F$为法拉第常数；$R$为理想气体常数；$T$为温度；$\eta_{\mathrm{a}}$、$\eta_{\mathrm{c}}$分别为阳极和阴极的活化过电压；$\eta_{\mathrm{a,eq}}$、$\eta_{\mathrm{c,eq}}$分别为阳极和阴极的浓差极化损耗。

(4)组分守恒方程

$$\rho\left(\nabla\cdot\vec{u}\right)\omega_i+\nabla\cdot J_i=R_i \quad (8)$$

式中：ω_i为组分 i 质量分数；R_i为组分 i 生成率；J_i为组分 i 扩散通量。

利用扩散模型确定J_i，模型为

$$J_i=-\rho D_{i,\mathrm{e}}\nabla\omega_i \quad (9)$$

$$D_{i,\mathrm{e}}=\frac{\varepsilon}{\tau}\left(\frac{1}{D_{\mathrm{m},i}}+\frac{1}{D_{\mathrm{K},i}}\right)^{-1} \quad (10)$$

式中：τ为曲折度；$D_{\mathrm{K},i}$为 Knudsen 扩散系数；$D_{\mathrm{m},i}$为混合物平均扩散系数；$D_{i,\mathrm{e}}$为有效扩散系数。

$$D_{\mathrm{K},i}=\frac{2\varepsilon r_{\mathrm{g}}}{3\tau}\left(\frac{8RT}{\pi M_i}\right)^{0.5} \quad (11)$$

$$D_{\mathrm{m},i}=\frac{1-x_i}{\sum_{j\neq i}x_j/D_{ij}} \quad (12)$$

式中：r_{g}为孔半径；M_i、x_i分别为组分i的分子量、摩尔分数；D_{ij}为 Stefan−Maxwell 二元扩散系数。

$$D_{ij}=\frac{3.16\times10^{-4}T^{1.75}}{p\left(v_i^{1/3}+v_j^{1/3}\right)^2}\left(\frac{1}{M_i}+\frac{1}{M_j}\right)^{0.5} \quad (13)$$

式中：v_i、v_j分别为组分i、j的扩散体积；M_j为组分 j 的分子量。

(5)能量方程

流体区域需考虑热传导和热对流，能量方程为

$$\nabla N_{\mathrm{T}}=\nabla\left(-\lambda_{\mathrm{f}}\nabla T+C_{\mathrm{f}}C_pT\vec{u}\right)=0 \quad (14)$$

式中：λ_{f}为流体的热导率；N_{T}为热通量；C_{f}为流体的摩尔浓度；C_p为流体的摩尔热容。

固体区域只需考虑热传导，能量方程为

$$\nabla N_{\mathrm{T}}=\nabla(-\lambda_{\mathrm{s}}\nabla T)=Q \quad (15)$$

式中：Q为导热量；λ_{s}为固体热导率。

1.2.2　模型验证

为验证本文建立的 SOFC 模型的有效性和可靠性，将数值模拟得到的极化曲线与 Zhao 等[18]的实验值进行了对比，两者采用相同的设计参数和操作条件，结果如图 2 所示。由图中可看出，模拟值与实验值基本吻合，可认为该模型及数值计算结果具有一定的准确性和可靠性。

2　结果和讨论

2.1　几何结构的影响

2.1.1　气体摩尔分数分布

本文中 SOFC 采用顺流进气方式。图 3、4 分别为不同连接体结构阳极侧氢气摩尔分数和阴极侧氧气摩尔分数分布。在工作电压为 0.7 V

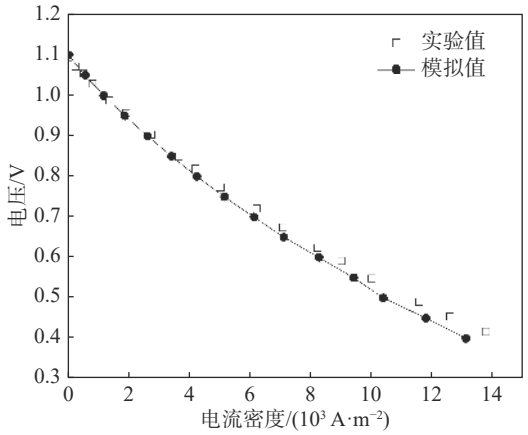


图 2 数值计算方法可靠性验证

Fig. 2 Reliability verification of the numerical method

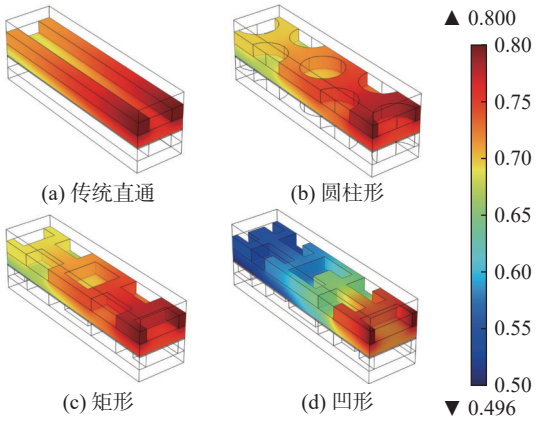


图 3 氢气摩尔分数分布

Fig. 3 Molar fraction distribution of hydrogen

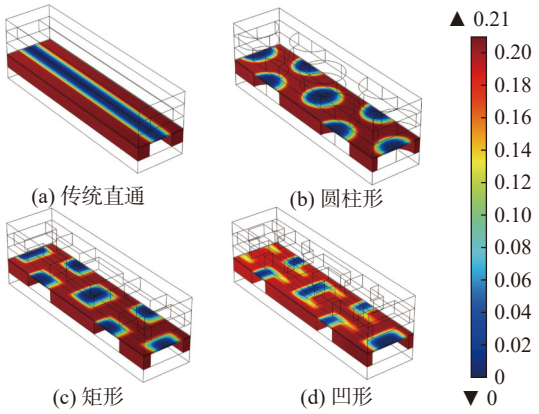


图 4 氧气摩尔分数分布

Fig. 4 Molar fraction distribution of oxygen

时，阳极气道入口处氢气摩尔分数均为 0.8，传统直通、圆柱形、矩形和凹形连接体结构流道出口处氢气摩尔分数分别为 0.67、0.65、0.65 和 0.50。这说明在相同的边界条件下，凹形连接体结构中氢气的耗散速率大于其余 3 种结构。由于本文采用的模型为阳极支撑型 SOFC，其阳极层较厚使氢气扩散得较为均匀，但由于阴极电极较薄，限制了氧气的横向扩散，导致在连接体与电极接触面下方出现氧耗尽区。为了更直观地比较 4 种连接体结构中氧气耗散能力，定义ζ_{O_2}，其表示阴极电极中氧气摩尔分数小于等于阴极电极中氧气摩尔分数x_{O_2}的体积占阴极总体积的比值。不同连接体结构阴极电极ζ_{O_2}对比如图 5 所示。当x_{O_2}=0.19时，4 种连接体结构的ζ_{O_2}较为接近，而当x_{O_2}=0.10 时，传统直通连接体结构的ζ_{O_2}为 0.37，圆柱形、矩形和凹形连接体结构的ζ_{O_2}分别比传统直通连接体结构的减少 16.82%，22.72% 和 48.08%。这表明相比于传统直通连接体结构，圆柱形和矩形连接体结构对氧气的耗散能力较好，而凹形连接体结构的更好。

2.1.2 电池极化曲线和功率密度

图 6 为 4 种连接体结构的 SOFC 在不同工作温度下的极化曲线、功率密度。从图中可以看出，随着温度升高，4 种连接体结构 SOFC 的电流密度和功率密度均增加。凹形连接体结构 SOFC 的极化曲线表现出最好的性能，其次是矩形、圆柱形连接体结构，最后是传统直通连接体结构。其中，工作温度为 800 ℃，电压在 0.5 V 以下时，由于凹形连接体结构在高温下对燃料及

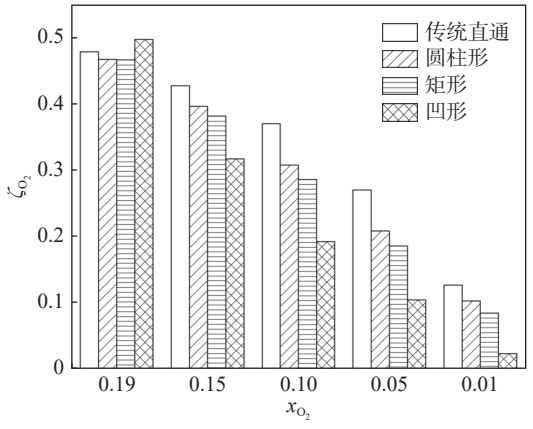


图 5 不同连接体结构阴极电极ζ_{O_2}比较

Fig. 5 Comparison of cathode ζ_{O_2} between different interconnectors

空气的消耗更多，因此会导致燃料短缺和严重的浓差极化，这也是此时电流密度急剧下降的原因。但在高电压下，其电流密度相较于传统直通连接体结构 SOFC 仍有大幅提升。在整个工作电压范围内，由欧姆损失、活化损失和浓度损失构成的 SOFC 电压损失随着电流密度的增大而增加。当电压损失达到一定程度时，燃料电池的功率密度会在达到峰值后开始下降。由图 6(b)中也可看出，4 种连接体结构 SOFC 的功率密度均随着电流密度的增大呈先增大，达到峰值后减小的趋势。圆柱形、矩形和凹形连接体结构 SOFC 的最大功率密度相较于传统连接体结构的在工作温度为 800 ℃ 时分别提高了 3.14%、3.50%、12.66%；在工作温度为 700 ℃ 时分别提高了 4.51%、5.14%、31.19%；工作温度为 600 ℃ 时分别提高了 2.22%、4.20%、18.77%。从功率密度提升程度看，凹形连接体结构的提升效果最明显，矩形、圆柱形连接体结构的次之。

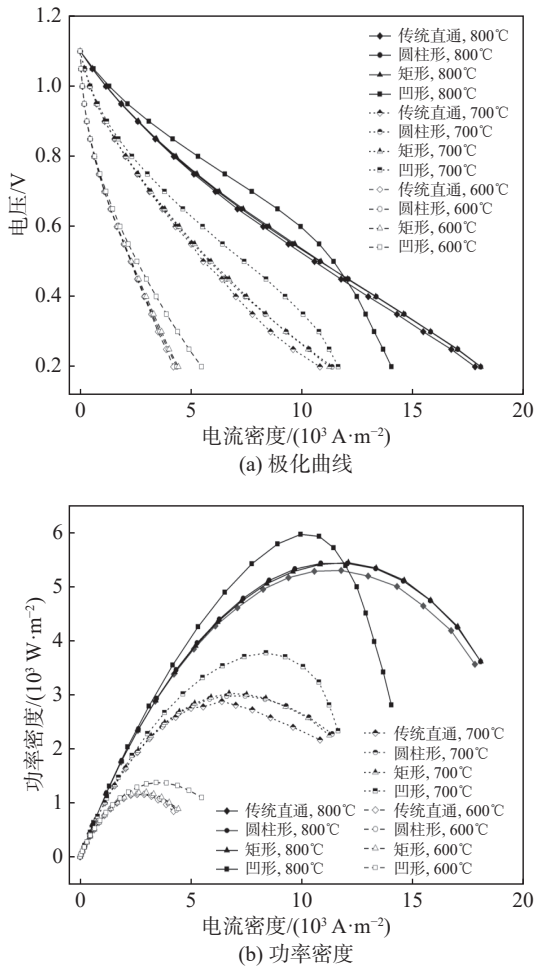


图 6　4 种连接体结构 SOFC 不同温度下的极化曲线、功率密度

Fig. 6　Polarization curves and power density of SOFC with four kinds of interconnectors at different temperature

2.1.3　电池温度分布

图 7(a) ～ (b)分别为工作电压为 0.7 V 时传统直通、圆柱形、矩形和凹形连接体结构 SOFC 温度分布。电池温度升高是由于电池中的电化学反应产热、活化极化产生的热以及接触电阻产生的欧姆热共同作用引起的。本文模型中燃料气体和空气均沿着斜轴正方向顺流流动。由图 7 中可以看出，气体入口温度和工作温度均为 973 K 时，传统直通连接体结构 SOFC 出口处温度升高 6 K，圆柱形、矩形和凹形连接体结构的 SOFC 出口温度分别升高 9、8 和 12 K。4 种连接体结构 SOFC 温度均沿气体流动方向逐渐上升，并在出口处达到最大值。此外，阴极气体流量远大于阳极气体流量，对流散发的热量更多，所以沿着气体流动方向，阴极气道的升温速度小于阳极。其中，由于圆柱形、矩形和凹形连接体结构阻碍了气体在斜轴正方向上的流动，导致热量无法直接被带出，从而使得温升升高。

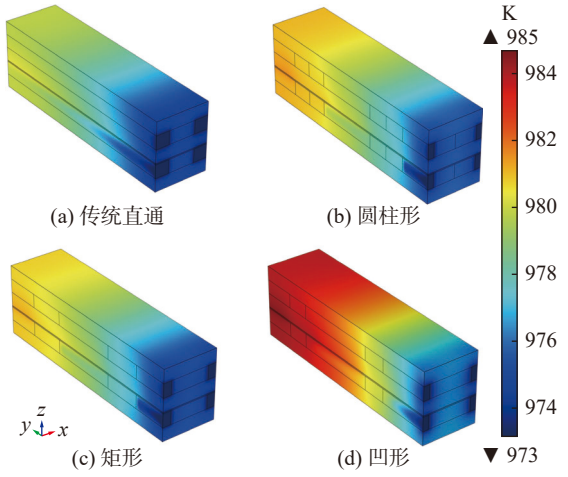


图 7　不同连接体结构 SOFC 温度分布

Fig. 7　Temperature distribution of SOFC with different interconnectors

2.2　孔隙率的影响

孔隙率ε是影响气体在电极中传输的重要参数。图 8 为 4 种不同连接体结构 SOFC 阳极孔隙

率ε_{an}、阴极孔隙率ε_{cn}与功率密度之间的关系。从图 8(a)中可看出，随着阳极孔隙率的增加，4 种不同连接体结构的功率密度随着孔隙率增加而增加，但增幅并不明显。当阳极孔隙率从 0.2 增加到 0.5 时，4 种结构连接体的功率密度分别仅增加了 1.64%、1.71%、1.71% 和 2.64%。从图 8(b)中可看出，阴极孔隙率对功率密度的影响相比于阳极孔隙率更明显，4 种连接体结构的功率密度随着阴极孔隙率的增加而增加，且增长速率逐渐减缓。这是因为增加孔隙率有利于气体扩散从而降低浓度极化，但另一方面，孔隙率的增加会导致电导率的下降，从而导致欧姆极化加剧。

凹形连接体结构 SOFC 的功率密度一直高于其余 3 种连接体结构。当阴极孔隙率为 0.2 时，圆柱形、矩形和凹形连接体结构的功率密度相较于传统直通连接体结构的分别提高了 2.60%、4.50% 和 25.96%；当阴极孔隙率为 0.5 时，圆柱形、矩形和凹形连接体结构的功率密度相较于传统连接体结构的分别提高了 0.62%、1.47% 和 18.26%。由此可知，当阴极孔隙率较小时，圆柱形、矩形和凹形连接体结构的性能优势更加明显。

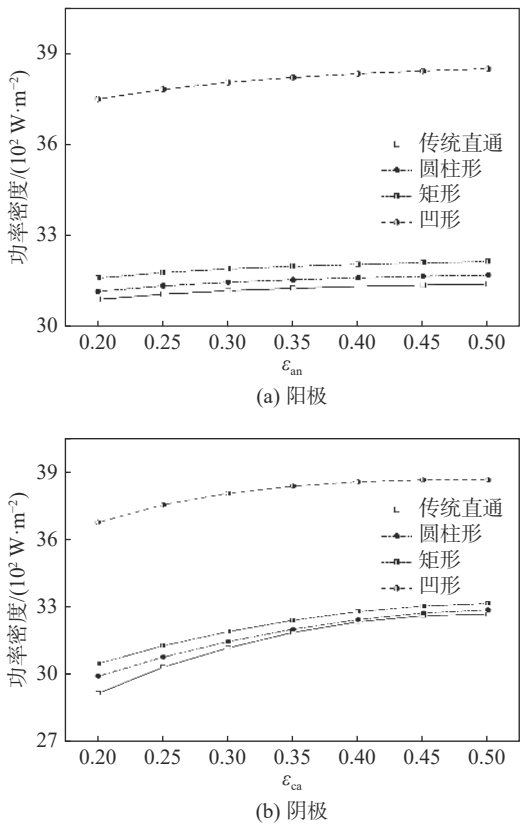


图 8 功率密度与电极孔隙率的关系

Fig. 8 Relationship between the power density and electrode porosity

3 结 论

采用数值模拟方法对固体氧化物燃料电池 4 种不同连接体结构对电池性能的影响进行了分析，并考虑了流体流动、物质传递、电化学反应和传热物理场的多场耦合作用。主要结论为：

(1)对于传统直通连接体结构 SOFC，连接体与阴极接触面下方出现了氧耗尽区。相比之下，圆柱形、矩形和凹形连接体结构可以有效缩小氧耗尽区面积，为电化学反应提供足够的氧气，从而提高燃料电池的性能。

(2)与传统连接体结构 SOFC 相比，圆柱形、矩形和凹形连接体结构 SOFC 在相同工作条件下的电流密度和功率密度更高。工作温度为 700 ℃ 时，圆柱形、矩形和凹形连接体结构 SOFC 性能提升最明显，最大功率密度分别提高了 4.51%、5.14%、31.19%。

(3)随着阳极、阴极孔隙率的增加，电池的功率密度也相应增加，阴极孔隙率对功率密度的影响大于阳极孔隙率。当阴极孔隙率较小时，圆柱形、矩形和凹形连接体结构 SOFC 的性能优势更加明显。

(4)4 种连接体结构 SOFC 的温度均沿着气体流动方向上升，凹形连接体结构的温升最大，圆柱形和矩形连接结构的次之。传统直通连接体结构由于在流动方向上没有阻碍，热量可以快速地被带出流道，因此其温升最小。

参考文献：

[1] HAGEN A, LANGNICKEL H, SUN X F. Operation of solid oxide fuel cells with alternative hydrogen carriers[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(33): 18382 − 18392.

[2] PENG J X, HUANG J, WU X L, et al. Solid oxide fuel cell (SOFC) performance evaluation, fault diagnosis and health control: a review[J]. Journal of Power Sources, 2021, 505: 230058.

[3] AL-KHORI K, BICER Y, BOULFRAD S, et al. Techno-economic and environmental assessment of integrating SOFC with a conventional steam and power system in a natural gas processing plant[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(56): 29604 − 29617.
[4] LEE S, PARK M, KIM H, et al. Thermal conditions and heat transfer characteristics of high-temperature solid oxide fuel cells investigated by three-dimensional numerical simulations[J]. Energy, 2017, 120: 293 − 305.
[5] TSERONIS K, FRAGKOPOULOS I S, BONIS I, et al. Detailed multi - dimensional modeling of direct internal reforming solid oxide fuel cells[J]. Fuel Cells, 2016, 16(3): 294 − 312.
[6] KONG W, GAO X, LIU S X, et al. Optimization of the interconnect ribs for a cathode-supported solid oxide fuel cell[J]. Energies, 2014, 7(1): 295 − 313.
[7] ZENG S M, ZHANG X Q, CHEN J S, et al. Modeling of solid oxide fuel cells with optimized interconnect designs[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 125: 506 − 514.
[8] BLUM L, MEULENBERG W A, NABIELEK H, et al. Worldwide SOFC technology overview and benchmark[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2005, 2(6): 482 − 492.
[9] JIANG S P, LOVE J G, APATEANU L. Effect of contact between electrode and current collector on the performance of solid oxide fuel cells[J]. Solid State Ionics, 2003, 160(1−2): 15 − 26.
[10] SCHLUCKNER C, SUBOTIĆ V, PREIßL S, et al. Numerical analysis of flow configurations and electrical contact positions in SOFC single cells and their impact on local effects[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(3): 1877 − 1895.
[11] KHAZAEE I, RAVA A. Numerical simulation of the performance of solid oxide fuel cell with different flow channel geometries[J]. Energy, 2017, 119: 235 − 244.
[12] MORENO-BLANCO J, ELIZALDE-BLANCAS F, RIESCO-AVILA J M, et al. On the effect of gas channels-electrode interface area on SOFCs performance[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(1): 446 − 456.
[13] CANAVAR M, TIMURKUTLUK B. Design and fabrication of novel anode flow-field for commercial size solid oxide fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2017, 346: 49 − 55.
[14] CHEN Q Y, WANG Q W, ZHANG J, et al. Effect of bi-layer interconnector design on mass transfer performance in porous anode of solid oxide fuel cells[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(9−10): 1994 − 2003.
[15] ZHAN R B, WANG Y, NI M, et al. Three-dimensional simulation of solid oxide fuel cell with metal foam as cathode flow distributor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(11): 6897 − 6911.
[16] YAN M, FU P, LI X, et al. Mass transfer enhancement of a spiral-like interconnector for planar solid oxide fuel cells[J]. Applied Energy, 2015, 160: 954 − 964.
[17] FU Q R, LI Z Y, WEI W, et al. Performance enhancement of planar solid oxide fuel cell using a novel interconnector design[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(41): 21634 − 21656.
[18] ZHAO F, VIRKAR A V. Dependence of polarization in anode-supported solid oxide fuel cells on various cell parameters[J]. Journal of Power Sources, 2005, 141(1): 79 − 95.

(上接第 127 页)

[2] 陈兴祥, 邓宇. 贵州煤层气地质特点与勘探开发对策分析 [J]. 化工设计通讯, 2021, 47(9): 12 − 13.
[3] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
[4] 张群, 冯三利, 杨锡禄. 试论我国煤层气的基本储层特点及开发策略 [J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 230 − 235.
[5] 高潮, 孙建博, 李强, 等. 煤层气渗流机理及产能影响因素分析 [J]. 化工管理, 2013(12): 206.
[6] 何伟钢, 叶建平. 煤层气井排采历史地质分析 [J]. 高校地质学报, 2003, 9(3): 385 − 389.
[7] 逄思宇, 贺小黑. 地应力对煤层气勘探与开发的影响 [J]. 中国矿业, 2014, 23(S2): 173 − 177.
[8] 陈江, 吕建伟, 郭东鑫, 等. 煤层气产能影响因素及开发技术研究 [J]. 资源与产业, 2011, 13(1): 108 − 113.
[9] 徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向 [J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 1 − 14.
[10] 许耀波. 煤层气井合层开发层间干扰分析与合采方法探讨——以平顶山首山一矿为例 [J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 112 − 117, 127.

信息

我国首个纯氢长输管道项目正式启动

4月10日，中国石化宣布，“西氢东送”输氢管道示范工程已被纳入《石油天然气“全国一张网”建设实施方案》，这标志着我国氢气长距离输送管道进入新发展阶段。

“西氢东送”起于内蒙古自治区乌兰察布市，终点位于北京市的燕山石化，管道全长400多km，是我国首条跨省区、大规模、长距离的纯氢输送管道。管道规划经过内蒙古、河北、北京等3省(市)9个县区。管道一期运力10万$t\cdot a^{-1}$，预留50万$t\cdot a^{-1}$的远期提升潜力。同时，将在沿线多地预留端口，便于接入潜在氢源。未来，中国石化可依托“西氢东送”管道建设支线及加氢母站，助力京津冀氢能走廊的高效构建，助力京津冀地区“双碳”目标的实现。

全球首次海上风电无淡化海水直接电解制氢海试成功

6月2日，由中国东方电气集团有限公司与谢和平院士团队联合开展的全球首次海上风电无淡化海水原位直接电解制氢技术海上中试在福建兴化湾海上风电场获得成功。

此次海上中试于5月中下旬开展，使用的是全球首套与可再生能源相结合的漂浮式海上制氢平台“东福一号”。该平台是海水无淡化原位直接电解制氢海试样机，集成了原位制氢、智慧能源转换管理、安全检测控制、装卸升降等系统于一体，在经受了8级大风、1 m高海浪、暴雨等海洋环境的考验后，连续稳定运行超过240 h，验证了由中国科学家原创的海水无淡化原位直接电解制氢原理与技术在真实海洋环境下的可行性和实用性。

美国本土以外首个特斯拉储能超级工厂项目正式落户上海

4月9日，特斯拉储能超级工厂项目签约仪式在上海正式举行。特斯拉储能超级工厂将规划生产特斯拉超大型商用储能电池(Megapack)，初期规划年产商用储能电池可达1万台，储能规模近40 GW·h，产品提供范围覆盖全球市场。特斯拉储能超级工厂项目计划于2023年第三季度开工，2024年第二季度投产。

可再生能源的未来有赖于大规模储能。特斯拉超大型商用储能电池可以支持千兆瓦时规模的低成本、高密度公用事业项目，灵活性是该电池的一大特点。它能随时与电池模块、逆变器和温度系统集成安装，帮助电网更加稳定、可持续。

中国“人造太阳”成功实现稳态高约束模式等离子体运行403 s

4月12日21时，中国有“人造太阳”之称的全超导托卡马克核聚变实验装置(EAST)创造新的世界纪录，成功实现稳态高约束模式等离子体运行403 s，刷新了2017年的101 s世界纪录，对探索未来的聚变堆前沿物理问题，提升核聚变能源经济性、可行性，加快实现聚变发电具有重要意义。

这次突破的主要意义在于“高约束模式”。高约束模式下粒子的温度、密度都大幅度提升，这为提升未来聚变电站的发电效率，降低成本，奠定了坚实物理基础。目前，下一代“人造太阳”中国聚变工程实验堆已完成工程设计，未来瞄准建设世界首个聚变示范堆。

(王 波)